重金属在拟水狼蛛体内的分布及对其体内抗氧化酶活性的影响

张征田[1]，庞振凌[1]，梁子安[1]，彭　宇[2]，杜瑞卿[1]
（1. 南阳师范学院生命科学与技术学院，河南南阳 473061；2. 湖北大学生命科学学院，武汉 430062）

摘要：为了探明重金属在拟水狼蛛 *Pirata subpiraticus* 体内的分布及对其体内抗氧化酶活性的影响，本研究于2009年6月在河南南阳地区5种不同生境下，共采集50份土壤样本和300头拟水狼蛛样本，采用原子吸收光谱法测定了5种不同生境下雄雌拟水狼蛛体内重金属的分布、GSH含量以及GST，CAT和SOD的活性。结果表明：5个采集样点(S1，S2，S3，S4和S5）拟水狼蛛体内重金属(Cd，Pb，Cu和Zn)的含量差异显著($P<0.05$)。同一地点拟水狼蛛体内重金属(Cd，Pb，Cu和Zn)的含量不同身体部位差异显著($P<0.05$)，头胸部>足部>腹部，同一地点雄性拟水狼蛛重金属含量显著高于雌性($P<0.05$)。在重金属胁迫下，重金属含量高(S1，S2，S3和S4)的拟水狼蛛体内GSH含量显著高于参照组(S5)，雄性GSH含量高于雌性($P<0.05$)。对于不同身体部位，GSH含量差异显著，头胸部GSH含量最高，其次为足部，腹部含量最低；GSH含量与重金属含量显著正相关($r^2=0.9854$，$P<0.05$)。对于GST，CAT和SOD，重金属含量高则酶活性低，雄性酶活性显著低于雌性，不同身体部位酶活差异不显著；GST，CAT和SOD酶活性与重金属(Cd和Pb或者Pb)含量显著负相关。因此检测拟水狼蛛不同身体部位的酶活性变化就可知环境中重金属的污染程度，拟水狼蛛可以作为重金属污染的重要监测指示生物。

关键词：拟水狼蛛；重金属污染；重金属含量；抗氧化酶；酶活性
中图分类号：Q966　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0454-6296(2010)06-0618-08

Distribution of heavy metals in *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) and their effect on activities of antioxidant enzymes

ZHANG Zheng-Tian[1], PANG Zhen-Ling[1], LIANG Zi-An[1], PENG Yu[2], DU Rui-Qing[1] (1. Department of Life Sciences, Nanyang Normal University, Nanyang, Henan 473061, China; 2. Faculty of Life Sciences, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: In order to study the distribution of heavy metals in wolf spider *Pirata subpiraticus* and their effect on activities of antioxidant enzymes, 50 soil samples and 300 individuals of *P. subpiraticus* were collected from five different habitats in Nanyang City, Henan Province in June 2009. The contents of heavy metals (Cd, Pb, Cu and Zn), GSH level, and GST, CAT and SOD activities in different body parts of *P. subpiraticus* were measured using atomic absorption spectrometry. The results showed that the contents of Cd, Cu and Zn in *P. subpiraticus* were significantly different between four heavy metal polluted habitats (TBJK, TBTK, NYYT, and NYJG) and the control habitat (BTM, a nature reserve with less heavy metal pollution) ($P<0.05$), and also significantly different among different body parts in the same site ($P<0.05$), whereas the rank order was cephalothorax > legs > abdomen. Contents of Cd, Cu and Zn in the male were significantly higher than those in the female ($P<0.05$). The higher the content of heavy metals, the higher the GSH level. Moreover, the GSH level in the male was significantly higher than that in the female ($P<0.05$). In different body parts, the highest GSH level was found in the cephalothorax, followed by legs and abdomen. GSH level and heavy metal content correlated positively ($r^2=0.9854$, $P<0.05$), while significant negative correlations existed between heavy metal content (Cd and Pb or Pb) and activities of antioxidant enzymes. The enzyme activities in the male were significantly lower than those in the female. In the same site activities of antioxidant enzymes were not significantly different among different body parts. Therefore, the degree of heavy metal pollution can be known through testing the activity change

基金项目：南阳师范学院青年项目(QN2010003)；河南省重点学科项目
作者简介：张征田，男，1978年生，硕士，主要从事动物学研究，E-mail: ztz0105@yahoo.com.cn
收稿日期 Received: 2010-01-19；接受日期 Accepted: 2010-03-29

of antioxidant enzymes of *P. subpiraticus*, and this wolf spider can be used as a very important bio-indicator for heavy metals pollution.

Key words: *Pirata subpiraticus*; heavy metal pollution; heavy metal content; antioxidant enzyme; enzyme activity

由于矿产的开采、冶炼厂三废的排放、含重金属农业化学物质的施用，使得环境中重金属的含量不断增加，重金属污染已经成为一个全球性的环境问题(Warchalowska-Sliwa *et al.*, 2005)。重金属污染不仅对生物多样性构成威胁，还能在食物链间转移和积累，危害生态系统中各级消费者以及人类健康。蜘蛛作为害虫天敌，也处于食物链的一个环节，同样会通过呼吸、摄食、体表接触等遭受生态环境中重金属离子的入侵，尽管它自身具有抵御重金属的多种生理生化机制，但重金属仍会对其生长发育以及生殖繁育造成严重的毒害效应。

南阳作为豫西南的重要能源和有色金属产地，在石油、煤炭和有色金属的开采和利用过程中，发生大量的重金属污染，对土壤表层动物也产生了重要影响(孙贤斌等，2005)。近年来，有关重金属污染对蜘蛛相近类群昆虫影响的文献逐渐增多，涉及 Cd, Zn, Cu, Pb, Hg, Ni 和 As 等重金属对弹尾目、双翅目、鳞翅目、鞘翅目、膜翅目和半翅目昆虫等的影响(Tack *et al.*, 2000; Bongers *et al.*, 2004; Eeva *et al.*, 2004; Hayford and Ferrington, 2005; Cervera *et al.*, 2005; 王慧等，2006; Nummelin *et al.*, 2007; 孙虹霞等，2007; 孙鸽等，2009)，但对蜘蛛的报道较少，尤其是对重金属污染下蜘蛛体内抗氧化酶系统影响报道更少(Wilczek *et al.*, 2003, 2004; Babczyń *et al.*, 2006)。拟水狼蛛 *Pirata subpiraticus* 是广布于河流、稻田和潮湿环境的一种游猎性优势蜘蛛(李剑泉等，2002)，张征田等(2009)曾报道河南南阳 5 种不同生境下雌拟水狼蛛体内重金属含量，以及重金属对雌蛛头胸甲宽、体重、卵袋重量、卵数目和卵体积等生物学指标有着显著影响。本研究主要在对南阳市煤矿、石油和铜矿等污染地研究的基础上，以拟水狼蛛为实验材料，研究蜘蛛身体各部位重金属的分布情况，测定抗氧化剂还原型谷胱甘肽(GSH)含量及抗氧化酶谷胱甘肽 S-转移酶(GST)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性，探讨其不同身体部位重金属的累积规律以及重金属毒害与抗氧化酶活性变化之间的关系，为研究重金属对蜘蛛抗氧化酶系统和蛋白质代谢的影响及其致毒机理提供依据，为重金属污染的生物监测提供理论依据，并为进一步研究重金属产生毒性效应的分子机理，及其对蜘蛛种群遗传进化的影响奠定基础。

1　材料与方法

1.1　样品采集与处理

1.1.1　拟水狼蛛的采集：为了减少实验误差，采集性成熟的雄、雌蛛作为实验材料。于 2009 年 6 月利用 GPS 定位，记录采样点植被、环境因子(表 1)，在 5 个样点利用平行线跳跃法手工采集 300 头拟水狼蛛带回实验室，以较少污染的南阳宝天曼国家自然保护区葛条爬采集的标本为对照组。

1.2　重金属含量的测定

参照 Tack 等(2000)方法略加改进。采用原子吸收法测定拟水狼蛛体内重金属(Cd, Pb, Cu 和 Zn)的含量。取拟水狼蛛雌、雄各 30 头，随机分成

表 1　采样方位及生境

Table 1　The sampling sites and habitats

样点编号 Site no.	样点 Sampling sites	经纬度 Latitude/longitude	生境特征 Habitat characteristics
S1	桐柏金矿 Tongbai Jinkuang (TBJK)	32°27′25″N, 113°19′50″E	黄色粉砂土，植被少以蒿草为主
S2	桐柏铜矿 Tongbai Tongkuang (TBTK)	32°32′49″N, 113°19′7″E	黄色粉砂土，植被少以蒿草为主
S3	南阳油田 Nanyang Youtian (NYYT)	33°0′58″N, 112°27′10″E	耕作土，砂质粘土，以农作物小麦居多
S4	南阳军工厂 Nanyang Jungong (NYJG)	33°1′24″N, 112°29′52″E	砂粒粘土，植被少以苔草为主
S5	宝天曼 Baotianman (BTM)	33°2′17″N, 111°56′22″E	砂质粘土，植被丰富以荔枝草为主

3 组，每组含雌、雄各 10 头。用医用镊子和剪刀将拟水狼蛛解剖成头胸部、腹部和足部 3 部分，进行样品编号，供测重金属含量用。测量前，用 1% HNO_3 溶解去掉体表皮毛上的重金属。然后 70℃ 烘箱中干燥 48 h，电子天平称重，精确到 0.1 mg。然后用 5 mL 65% 纯 HNO_3 在 130℃ 溶解 1 h，添加 2 mL 20% H_2O_2 溶液，30 min 后再添加 2 mL 20% H_2O_2 溶液至完全溶解。样品添加 1% HNO_3 至 10 mL备用。然后用原子吸收分光光度计（日本日立 Z-5000）测定 Cu 和 Zn 的含量，Cd 和 Pb 的测定选用背景校正为塞曼效应。所有重金属含量以每 g 蜘蛛干重所含的 μg 数重量，精确到 0.1 μg，每地点重复测量 10 头。土壤样品重金属含量测定方法同上，土壤样品重金属含量以单位样品干重所含的重量，精确到 0.1 mg，每样品重复测量 3 次，取平均值。

1.3 酶液提取

取拟水狼蛛雌、雄各 30 头，随机分成 3 组，每组含雌、雄虫各 10 头。用医用镊子和剪刀在冰上将拟水狼蛛解剖成成头胸部、腹部和足部 3 部分，供测酶活性用。将供试蜘蛛置于预冷的玻璃匀浆器中，加入 0.5 mL 的 50 mmol/L 磷酸缓冲液（pH 7.0）和少量苯基硫脲，在冰浴中匀浆。匀浆液置 Beckman 冷冻离心机于 0℃，6 000 r/min 离心 20 min，取上清液作为酶原，-70℃ 冰箱保存备用。

1.4 GSH 含量及 GST 活性测定

GSH 含量测定参照张宗申等（2001）的方法，采用二硫代硝基苯甲酸（DTNB）染色法。谷胱甘肽 S-转移酶（GST）以 1-氯 2，4-二硝基苯（CDNB）为底物，根据 Zhu 等（2000）的方法稍加修改进行测定。即 10 μL 适当稀释的酶液与 190 μL 200 mmol/L 谷胱甘肽和 10.35 mmol/L 的 CDNB 混合液（GSH∶CDNB = 188∶2）混合，用酶标仪在 340 nm 处每隔 10 s计数 1 min，记录 OD 值。对照组以 10 μL 缓冲液代替酶液。CDNB 的摩尔消光系数为 9.6 mmol/L/cm。每样品重复测定 3 次，取平均值。

1.5 SOD 和 CAT 活性测定

SOD 活性测定参照邓碧玉等（1991）的方法：在 25℃下，于 4.5 mL 的 50 mmol/L 的 Tris-HCl 缓冲液（pH 8.2）中加入待测酶液样品 10 μL，再加入 10 μL 45 mmol/L 的联苯三酚，迅速摇匀，倒入光径 1 cm 的比色杯内，在 325 nm 波长下每隔 30 s 测光吸收值一次，要求自氧化速率控制在 0.070 OD/min左右。根据酶液中可溶性蛋白含量及吸光值计算该酶比活力。一个酶活单位定义为在 1 mL 反应液中，每分钟抑制联苯三酚自氧化率达 50% 的酶量。每样品重复测定 3 次，取平均值。

CAT 活性测定参照雷柏平等（1993）的方法：取 0.1 mL 待测酶液样品加入 0.4 mL 的 0.2 mol/L H_2O_2溶液和 0.5 mL 的 0.01 mol/L 磷酸盐缓冲液（pH 7.0）的混合液中，混匀，准确计时，至反应 60 s 时立即加入 2 mL 醋酸重铬酸钾溶液终止反应，然后在沸水中煮沸 10 min，室温下冷却，以分光光度计于波长 570 nm 处测定光吸收值。根据酶液中可溶性蛋白含量及吸光值计算该酶比活力。每样品重复测定 3 次，取平均值。

1.6 蛋白含量测定

蛋白含量根据 Smith 等（1985）等的方法，用牛血清白蛋白作为标准来测定，用酶标仪在 560 nm 处读取 OD 值。每样品重复测定 3 次，取平均值。

1.7 数据处理与分析

所有数据采用 SPSS 10.0 软件进行 One-way ANOVA 中的 Duncan 氏多重比较和线性回归来进行分析。

2 结果与分析

2.1 重金属在拟水狼蛛体内不同身体部位的分布

从表 2 可看出 4 个采集样点（S1，S2，S3，S4）拟水狼蛛体内重金属（Cd，Pb，Cu 和 Zn）的含量与参照组 S5 重金属含量相比，差异显著（$P < 0.05$），S5 样点拟水狼蛛体内重金属含量最低。同一地点拟水狼蛛体内重金属（Cd，Pb，Cu 和 Zn）的含量不同身体部位差异显著（$P < 0.05$），其中头胸部最高，其次为足部，腹部含量最低。对于 Cd，Cu 和 Zn，同一地点雄性拟水狼蛛单位干重所含重金属显著高于雌性（$P < 0.05$），对于 Pb，除了 S2 样点雄性拟水狼蛛重金属含量与雌性重金属含量相等外，其他样点雄性拟水狼蛛单位干重所含重金属显著高于雌性（$P < 0.05$）。

2.2 拟水狼蛛体内 GSH 含量及与其相关酶的活性

图 1 和图 2 显示不同样点雄雌拟水狼蛛不同身体部位 GSH 含量，对不同样点同一身体部位 GSH 含量进行 Duncan 氏多重比较，从图 1 和图 2 可以看出，重金属含量高（S1，S2，S3 和 S4）的拟水狼蛛体内 GSH 含量显著高于参照组（S5）（$P < 0.05$）。对于不同身体部位，GSH 含量差异显著，头胸部

GSH 含量最高，其次为足部，腹部含量最低。对于同一样点，同种身体部位雄性拟水狼蛛体内 GSH 含量高于雌性 ($P<0.05$)。通过简单相关分析表明，拟水狼蛛体内 GSH 含量与重金属含量显著正相关($r^2=0.9854$, $P<0.05$)。

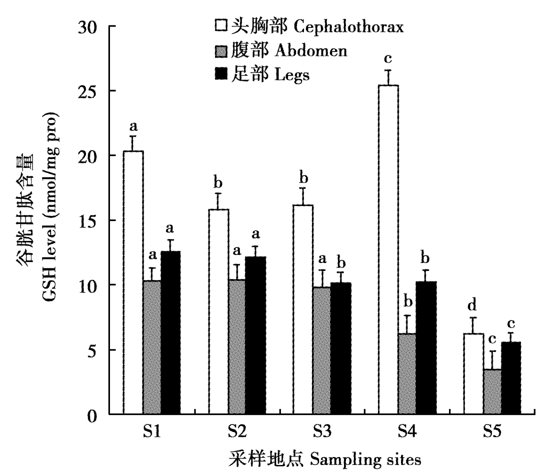


图 1 不同样点中雄性拟水狼蛛不同身体部位 GSH 的含量
Fig. 1 GSH concentrations in different body parts of male *Pirata subpiraticus* from different sampling sites
不同字母表示不同地点同一身体部位 GSH 含量差异显著(Duncan 氏多重比较, $P<0.05$)；下同。Means followed by different letters in the same body part from different habitats indicate significant difference (Duncan's multiple range test, $P<0.05$). The same below.

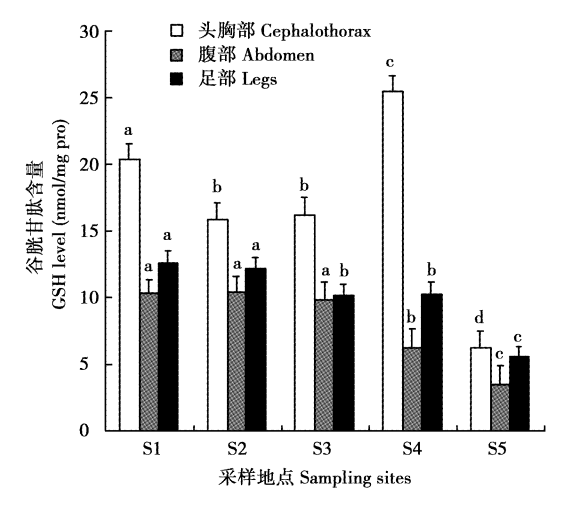


图 2 不同样点中雌性拟水狼蛛不同身体部位 GSH 的含量
Fig. 2 GSH concentrations in different body parts of female *Pirata subpiraticus* from different sampling sites

对不同样点同一身体部位 GST 活性进行 Duncan 氏多重比较，从图 3 和图 4 可以看出，雄性拟水狼蛛 GST 活性显著低于雌性拟水狼蛛，与参照组(S5)相比,重金属含量高(S1,S2,S3和S4)的拟水狼蛛体内 GST 活性低。对于雄性或雌性，样点(S1, S2 和 S3)与样点(S4)头胸部 GST 活性差异显著，样点(S1 和 S2)与样点(S3 和 S4)腹部 GST 活性差异显著，其他差异不显著。

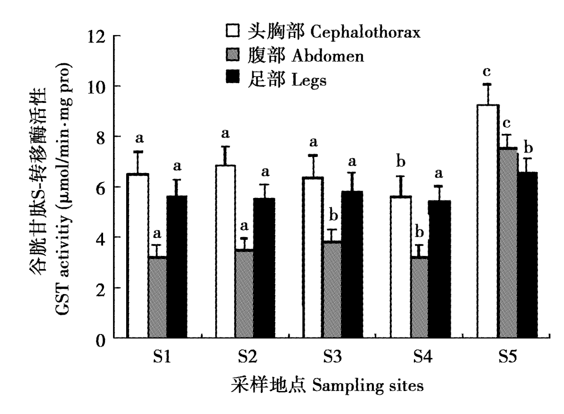


图 3 不同样点中雄性拟水狼蛛不同身体部位 GST 的活性
Fig. 3 GST activities in different body parts of male *Pirata subpiraticus* from different sampling sites

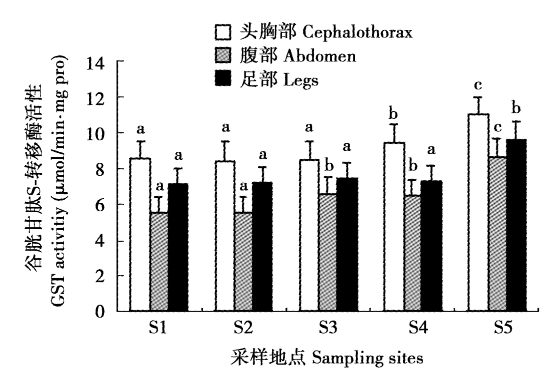


图 4 不同样点中雌性拟水狼蛛不同身体部位 GST 的活性
Fig. 4 GST activities in different body parts of female *Pirata subpiraticus* from different sampling sites

2.3 拟水狼蛛体内 SOD 活性

图 5 和图 6 显示不同样点雄雌拟水狼蛛不同身体部位 SOD 活性，对不同样点同一身体部位 SOD 活性进行 Duncan 氏多重比较，从图 5 和图 6 可以看出，同一样点雄性拟水狼蛛 SOD 活性显著低于雌性拟水狼蛛 ($P<0.05$)。与参照组(S5)相比，重金属含量高(S1, S2, S3 和 S4)的拟水狼蛛体内 SOD 活性低。对于样点(S1, S2, S3 和 S4)的雄雌拟水狼蛛，不同身体部位 SOD 活性差异不显著。通过简单相关分析表明，拟水狼蛛体内 SOD 含量与重金属 Cd 和 Pb 含量显著负相关($r^2=0.9562$, $P<0.05$)，说明 Cd 和 Pb 是重要的污染金属。

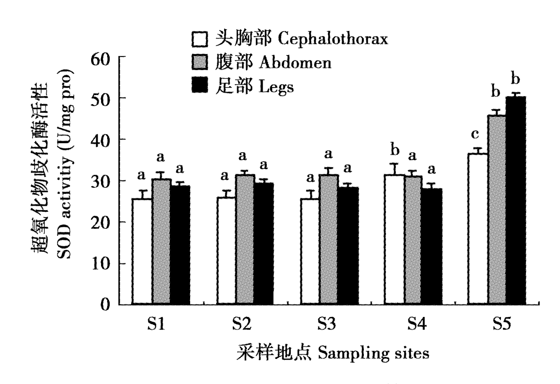


图 5　不同样点中雄性拟水狼蛛不同身体部位 SOD 的活性

Fig. 5　SOD activities in different body parts of male *Pirata subpiraticus* from different sampling sites

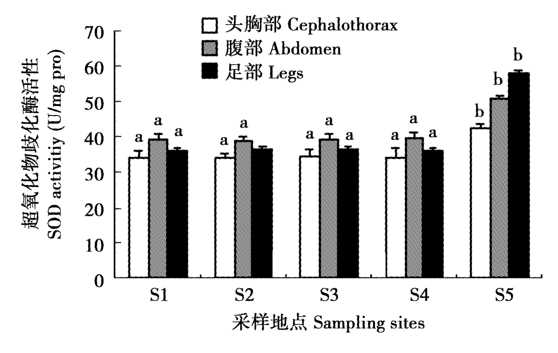


图 6　不同样点中雌性拟水狼蛛不同身体部位 SOD 的活性

Fig. 6　SOD activities in different body parts of female *Pirata subpiraticus* from different sampling sites

2.4　拟水狼蛛体内 CAT 的活性

图 7 和图 8 显示不同样点雄雌拟水狼蛛不同身体部位 CAT 活性，对不同样点同一身体部位 CAT 活性进行 Duncan 氏多重比较，从图 7 和图 8 可以看出，同一样点雄性拟水狼蛛 CAT 活性显著低于雌性拟水狼蛛（$P < 0.05$）。与参照组（S5）相比，重金属含量高（S1，S2，S3 和 S4）的拟水狼蛛体内 CAT 活性低。对于样点（S1，S2，S3 和 S4）的雄拟

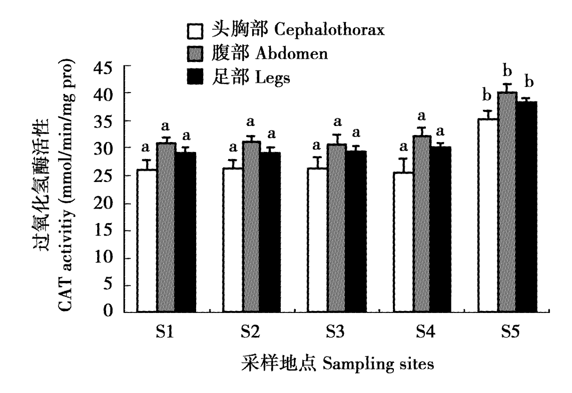


图 7　不同样点中雄性拟水狼蛛不同身体部位 CAT 的活性

Fig. 7　CAT activities in different body parts of male *Pirata subpiraticus* from different sampling sites

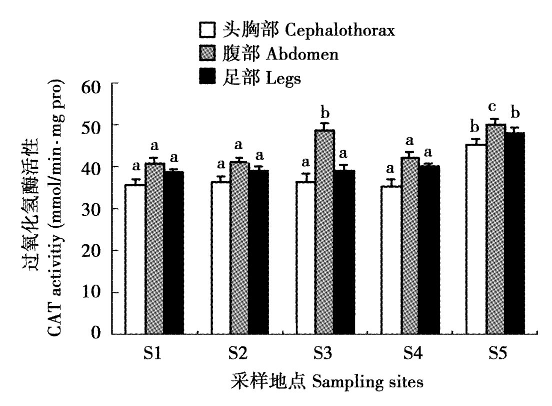


图 8　不同样点中雌性拟水狼蛛不同身体部位 CAT 的活性

Fig. 8　CAT activities in different body parts of female *Pirata subpiraticus* from different sampling sites

水狼蛛，不同身体部位 CAT 活性差异不显著。对于雌拟水狼蛛，样点（S1，S2 和 S4）同一身体部位 CAT 活性差异不显著，与样点 S3 相比腹部 CAT 活性差异显著。通过简单相关分析表明，拟水狼蛛体内 CAT 活性与重金属 Pb 含量显著负相关（$r^2 = 0.8964$，$P < 0.05$），说明 Pb 是重要的污染金属。

3　讨论

环境中重金属通过取食方式进入拟水狼蛛体内以后，重金属可在不同的组织器官中分布。由于不同组织器官结构、功能与代谢能力的差异，以及重金属对组织器官的亲和性不同，致使重金属在不同组织器官内的蓄积存在差异。本研究表明，重金属在头胸部积累最多，其次是足部，腹部最少。这与其他昆虫方面的报道有所不同（吴海花等，2009），与张仲胜等（2009）报道一致，导致此种结果的原因可能是与拟水狼蛛的生活习性及消化系统特殊性有关。蜘蛛的头胸部、腹部及足部中均分布有消化器官。蜘蛛的头胸部中分布有口、咽、食道和吸吮胃，其中咽和吸吮胃主要的作用是将液态食物吸入体内。腹部分布有蜘蛛中肠，而在足部则分布有中肠分支盲囊用于暂时储存液体食物，拟水狼蛛进食频率小，大部分食物储存在盲囊中，因此重金属含量也较高。对于同一样点，雄性和雌性重金属含量差异显著，雄性高于雌性，这与 Wilczek 等（2004）报道一致，可能的原因是雌性个体体重大于雄性，生物量稀释作用的增强（张征田等，2009），加上雌性蜘蛛的生殖和繁育功能强的程度加大，能耗增强，排泄较多，从而降低了体内的重金属含量或者转移了一部分重金属。因此由性别差异引起的重金

属含量差异的深层次的原因应开展进一步的研究。

动物体内抗氧化酶系统在防御外界不良环境的危害、保护正常生长发育及生理功能的完成、保持种群增长中具有重要作用。动物体内的自由基可以通过各种抗氧化剂和抗氧化酶的作用而清除。本研究结果表明，抗氧化剂 GSH 的含量与重金属含量成正相关，这与 Wilczek 等(2004)报道基本一致，与昆虫方面的报道不一致(吴海花等，2009)。此现象可能与生物体对 GSH 的利用有关。GSH 在保护细胞免受毒性物质的危害中起重要作用(Anderson and Luo，1998)，其活性基团-SH 可与过量的重金属结合，从而减轻或消除重金属的危害作用，这也表明了受重金属污染的拟水狼蛛已经对体内重金属成分颗粒有一定的耐受性。抗氧化酶的活性刚好跟抗氧化剂 GSH 相反，GST，SOD 和 CAT 的活性都受到了重金属的抑制，与重金属的含量显著负相关，说明在拟水狼蛛受到重金属胁迫以后快速适应，并及时发挥其保护作用，为生物体的正常发育提供了重要保障，这与 Cervera 等(2003)、Migula 等(1997)和孙虹霞等(2008)分别用不同重金属处理昆虫，体内 CAT 活力明显为增高的结果不一致。说明重金属对动物体内抗氧化酶系统的影响因动物种类以及重金属种类而异。导致此种结果的原因可能是一方面 GSH 含量的增加扰乱了其他酶的活性，另一方面可能是因重金属离子与酶分子中的其他金属离子发生竞争性替代作用而抑制了酶的活力。Bauer 等(1980)发现 Cd 可替代 SOD 中的 Zn 形成 Cu/Cd SOD，从而影响 SOD 的活力；酶活力的降低，使自由基的清除受影响，自由基又加重了酶活力的抑制。因此重金属对生物体的毒性作用及生物体抗氧化系统对重金属胁迫的应激性均是一个较为复杂的系统，重金属并非一进入生物体内就会对其造成氧化胁迫，而是有一个阈值，因此，确定生物体内重金属对拟水狼蛛胁迫的阈值也是我们下一步研究的内容。

最后，需要指出的是重金属对拟水狼蛛体内抗氧化酶系抑制作用相当明显，因此，可尝试将这种变化用作监测环境重金属污染程度的重要生物指标之一。

参 考 文 献(References)

Anderson ME, Luo JL, 1998. Glutathione therapy: from prodrugs to genes. *Semin. Liver Dis.*, 18: 415–424.

Babczyńska A, Wilczek G, Migula P, 2006. Effects of dimethoate on spiders from metal pollution gradient. *Sci. Total Environ.*, 370: 352–359.

Bauer R, Demeter I, Hasemann V, Johansen J, 1980. Structural properties of the zinc sites in Cu, Zn-superoxide dismutase perturbed angular correlation of Gamma ray spectroscopy on the Cu, ^{111}Cd-superoxide dismutase derivative. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 94(4): 1296–1302.

Bongers M, Rusch B, van Gestel CAM, 2004. The effect of counterion and percolation on the toxicity of lead for the springtail *Folsomia candida* in soil. *Environ. Toxicol. Chem.*, 23(1): 195–199.

Cervera A, Maymó AC, Martínez-Pardo R, Garcera M, 2003. Antioxidant enzymes in *Oncopeltus fasciatus* (Heteroptera: Lygaeidae) exposed to cadmium. *Environ. Entomol.*, 32(4): 705–710.

Cervera A, Maymó AC, Martínez-Pardo R, Garcerá MD, 2005. Vitellogenesis inhibition in *Oncopeltus fasciatus* female (Heteroptera: Lygaeidae) exposed to cadmium. *J. Insect Physiol.*, 51: 895–911.

Deng BY, Yuan QS, Li WJ, 1991. Improved method of pyrogallol self-oxidation fordetermination of superoxide dismutase. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 18(2): 163. [邓碧玉，袁勤生，李文杰，1991. 改良的连苯三酚自氧化测定超氧化物歧化酶活性的方法. 生物化学与生物物理进展，18(2): 163]

Eeva T, Sorvari J, Koivunen V, 2004. Effects of heavy metal pollution on red wood ant (*Formica s. str.*) populations. *Environ. Pollut.*, 132: 533–539.

Hayford BL, Ferrington LC, 2005. Biological assessment of Cannon Creek, Missouri by use of emerging Chironomidae (Insecta: Diptera). *J. Kans. Entomol. Soc.*, 78(2): 89–99.

Lei BP, Zhou BT, Cai HW, Yin CN, Tan XJ, Xu QM, 1993. Colorimetry for determination of catalase. *Chinese Journal of Clinical Laboratory Science*, 11(2): 73–74. [雷柏平，周伯通，蔡宏伟，尹楚南，谭秀娟，徐启明，1993. 过氧化氢酶活性的比色测定法. 临床检验杂志，11(2): 73–74]

Li JQ, Shen ZR, Zhao ZM, Luo YJ, 2002. Biology and ecology of the wolf spider *Pirata subpiraticus*. *Acta Ecologica Sinica*, 22(9): 1478–1484. [李剑泉，沈佐锐，赵志模，罗雁婕，2002. 拟水狼蛛的生物学生态学特性. 生态学报，22(9): 1478–1484]

Migula P, Glowacka E, Nuorteva SL, Nuorteva P, Tulisalo E, 1997. Time-related effects of intoxication with cadmium and mercury in the red wood ant. *Ecotoxicology*, 6: 307–320.

Nummelin M, Lodenius M, Tulisalo E, Hirvonen H, Alanko T, 2007. Predatory insects as bioindicators of heavy metal pollution. *Environmental Pollution*, 145: 339–347.

Smith PK, Krohn RI, Hermanson GT, Gartner FH, Frovenzano MD, Fujimoto EK, Olson BJ, Klenk DC, 1985. Measurement of protein using bicinchoninic acid. *Analytical Biochemistry*, 150: 76–85.

Sun G, Wu HH, Xi YY, Yang ML, Ma EB, Guo YP, 2009. Accumulation and distribution of cadmium in *Oxya chinensis* after feeding on wheat seedlings contaminated with Cd. *Journal of Agro-Environment Science*, 28(9): 1812–1817. [孙鸽，吴海花，席玉英，杨美玲，马恩波，郭亚平，2009. 长期取食染镉小麦后中华稻蝗体内镉的累积分布. 农业环境科学学报，28(9):

1812 - 1817]

Sun HX, Liu Y, Zhang GR, 2007. Effects of heavy metal pollution on insects. *Acta Entomologica Sinica*, 50(2): 178 - 185. [孙虹霞, 刘颖, 张古忍, 2007. 重金属污染对昆虫生长发育的影响. 昆虫学报, 50(2): 178 - 185]

Sun HX, Zhou Q, Tang WC, Shu YH, Zhang GR, 2008. Effects on the antioxidant enzymes in *Spodoptera litura* Fabricius midgut cell exposed to heavy metals Ni^{2+} in the food. *Chinese Science Bulletin*, 53(18): 2195 - 2199. [孙虹霞, 周强, 唐文成, 舒迎花, 张古忍, 2008. 食物中 Ni^{2+} 胁迫对斜纹夜蛾幼虫中肠细胞解毒酶的影响. 科学通报, 53(18): 2195 - 2199]

Sun XB, Li YC, Zhang XP, Wang ZY, 2005. Influence of heavy metal pollution on soil animal community and its diversity in Huainan City. *Chinese Journal of Ecology*, 24(10): 1163 - 1166. [孙贤斌, 李玉成, 张小平, 王宗英, 2005. 淮南市重金属污染对土壤动物群落和多样性影响研究. 生态学杂志, 24(10): 1163 - 1166]

Tack FMG, Bogaert N, Verloo MG, Hendrickx F, Maelfait JP, Mertens J, 2000. Determination of Cd, Cu, Pb and Zn in woodlouse (*Oniscus asellus*). *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, 78(2): 149 - 158.

Wang H, Wu GX, Ye GY, Hu C, Cheng JA, 2006. Accumulation of cuprum and cadmium and their effects on the antioxidant enzymes in *Boettcherisca peregrina* exposed to cuprum and cadmium. *Journal of Zhejiang University (Agricultural and Life Science Edition)*, 32(1): 77 - 81. [王慧, 吴国星, 叶恭银, 胡萃, 程家安, 2006. 铜和镉在棕尾别麻蝇体内的累积及其对三种抗氧化酶活性的影响. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 32(1): 77 - 81]

Warchalowska-Sliwa E, Niklińska M, Görlich A, Michailova P, Pyza E, 2005. Heavy metal accumulation, heat shock protein expression and cytogenetic changes in *Tetrix tenuicornis* (L.) (Tetrigidae, Orthoptera) from polluted areas. *Environ. Pollut.*, 133: 373 - 381.

Wilczek G, Babczyńska A, Augustyniak M, Migula P, 2004. Relations between metals (Zn, Pb, Cd and Cu) and glutathione-dependent detoxifying enzymes in spiders from a heavy metal pollution gradient. *Environ. Pollut.*, 132: 453 - 461.

Wilczek G, Babczyńska A, Migula P, Wencelis B, 2003. Activity of esterase as biomarkers of metal exposure in spiders from the metal pollution gradient. *Polish J. Environ. Stud.*, 12(6): 765 - 771.

Wu HH, Yan HP, Sun G, Guo YP, Zhang XM, Xi YY, Ma EB, 2009. Comparisons of cadmium and lead concentrations and antioxidant enzyme activities in different body segments of *Oxya chinensis*. *Journal of Agro-Environment Science*, 28(3): 471 - 475. [吴海花, 闫会平, 孙鸽, 郭亚平, 张小民, 席玉英, 马恩波, 2009. 中华稻蝗不同体段镉与铅含量及抗氧化酶的比较. 农业环境科学学报, 8(3): 471 - 475]

Zhang ZS, Li RQ, Wang JB, 2001. Effects of Ca^{2+} pretreatment on plasmale mma permeability, GSH and AsA contents, and calcium distribution in pepper mesophyll cells under heat stress. *Acta Phytoecologica Sinica*, 25(2): 230 - 234. [张宗申, 利容千, 王建波, 2001. 外源 Ca^{2+} 预处理对高温胁迫下辣椒叶片细胞膜透性和 GSH、AsA 含量及 Ca^{2+} 分布的影响. 植物生态学报, 25(2): 230 - 234]

Zhang ZS, Lv XG, Wang QC, Zheng DM, Zheng N, Zhang XY, Zhang XW, 2009. Mercury contents and distributions in spiders around the zinc smeltery in Huludao city. *Journal of Agro-Environment Science*, 28(3): 481 - 484. [张仲胜, 吕宪国, 王起超, 郑冬梅, 郑娜, 张新艳, 张秀武, 2009. 葫芦岛锌厂周围蜘蛛体内的汞含量及分布. 农业环境科学学报, 28(3): 481 - 484]

Zhang ZT, Xia M, Peng Y, Du RQ, 2009. Heavy metal levels in soil and their effects on biological characteristics of *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) in different habitats in Nanyang, Henan. *Acta Entomologica Sinica*, 52(9): 994 - 999. [张征田, 夏敏, 彭宇, 杜瑞卿, 2009. 河南南阳不同生境土壤重金属含量及其对拟水狼蛛生物学特性的影响. 昆虫学报, 52(9): 994 - 999]

Zhu KY, Gao JR, Starkey SR, 2000. Organophosphate resistance mediated by alterations of acetylcholinesterase in a resistant clone of the green-bug, *Schizaphis graminum* (Homoptera: Aphiditae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 68: 138 - 147.

（责任编辑：赵利辉）